

¿Qué son los cubits transmon?

Giselle N. Morales Rosales
Manuel Ávila Aoki

La computación cuántica es una revolución para la computación porque provee una forma diferente de procesar la información utilizando los principios de la mecánica cuántica. A pesar de ser una tecnología relativamente nueva, avanza rápidamente (Reck y Basak, 2022). Las computadoras cuánticas ofrecen la posibilidad de realizar ciertas tareas computacionales de manera exponencialmente más rápida que las computadoras clásicas (Wang *et al.*, 2022).

Las computadoras clásicas funcionan mediante electricidad y su unidad básica de información es el bit, que puede tomar dos valores: 0 o 1 (Arriola, 2004). Los transistores actúan como interruptores controlados electrónicamente que pueden encenderse o apagarse. Cuando un transistor está encendido, deja pasar el flujo de corriente eléctrica, representando el valor lógico 1. Por otro lado, cuando el transistor está apagado, bloquea el flujo de corriente y eso representa el valor lógico 0.

Los videos, las imágenes y todo lo que se ve en una pantalla de una computadora está generado por estos bits, que no son más que combinaciones de unos y ceros. Sin embargo, se está llegando a un límite (Reck y Basak, 2022) tanto en el *hardware*, debido a las restricciones físicas de la miniaturización de los transistores, como en el *software*, en términos de procesamiento y velocidad de la información. Además, existen problemas difíciles de resolver para una computadora clásica, como la



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

factorización de grandes números enteros en sus factores primos (que es la base de la mayoría de los sistemas criptográficos actuales), la resolución de sistemas de ecuaciones lineales, la búsqueda en bases de datos desordenadas, entre otras aplicaciones (Ezratty, 2023). La computación cuántica ofrece una posible solución a estos problemas.

Pero, ¿cómo funciona una computadora cuántica? Esta utiliza bits cuánticos, también llamados cubits, que a diferencia de los bits clásicos pueden estar en un estado cuántico de superposición. Es decir, un cubit puede estar en los estados base $|0\rangle$ o $|1\rangle$ o en una combinación de estos estados de forma simultánea, con diferentes pesos estadísticos. La cantidad de estados base dependerá del número de cubits (n) que conformen el sistema cuántico; para determinarlos, se utiliza 2^n . Por ejemplo, para el caso de 2 cubits, es $2^2 = 4$, por lo que sus estados base son $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ y $|11\rangle$.

Para entender mejor la diferencia entre un bit y un cubit, se puede hacer una analogía: imagine que está con los ojos vendados y tiene una moneda en la mano. La moneda puede estar en uno de dos estados: cara (1) o cruz (0). En este caso, la moneda actúa como un bit clásico.

Ahora, imagine que tiene una moneda especial, una moneda cuántica. Esta moneda tiene una característica única: mientras la sostiene en la mano,

puede estar en un estado de cara ($|1\rangle$) y de cruz ($|0\rangle$) al mismo tiempo, es decir, puede estar en superposición. ¿Cómo es esto posible? Imagine que la moneda gira sobre su propio eje y en cualquier momento no solo puede tomar el valor de cara o cruz, sino que también puede tener un pequeño porcentaje de cara y el resto de porcentaje de cruz, o al revés, o ambos estados pueden estar en 50 % y 50 %. Así, se tienen infinitos estados posibles. El estado de superposición para un cubit se representa por:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (1)$$

donde los coeficientes α y β son números complejos.

Únicamente si se retira la venda de los ojos y se observa la moneda cuántica, esta colapsará de esa combinación de estados a uno de los dos estados posibles, al igual que cuando se mide un cubit en un sistema cuántico, para lo cual se tendrá una probabilidad de $|\alpha|^2$ de que se encuentre en el estado $|0\rangle$ y una probabilidad $|\beta|^2$ de que este en el estado $|1\rangle$. De manera que, de acuerdo con la conservación de la probabilidad:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \quad (2)$$

Esto significa que la suma de las probabilidades de todos los posibles resultados siempre debe de ser uno, para garantizar que la probabilidad total esté correctamente distribuida.

La capacidad de superposición es lo que hace que los cubits sean poderosos en la computación cuántica, ya que permite realizar múltiples cálculos al mismo tiempo.

Los algoritmos cuánticos, que son un conjunto de instrucciones diseñado para realizar los cálculos en una computadora cuántica, se construyen a partir de una combinación específica y ordenada de compuertas cuánticas.

Una compuerta cuántica es un bloque fundamental de construcción utilizado para manipular la información almacenada en los cubits. Sin embargo, los cubits cuentan con fuentes naturales de ruido y disipación que pueden ocasionar errores en las compuertas (Martinis, 2022).

Además, cuando un cubit interactúa con su entorno se produce el llamado ruido cuántico, y esta fluctuación en la cantidad de energía puede modificar el estado cuántico del cubit. Esto es muy importante, porque la lectura rápida y precisa del estado del cubit es fundamental para la comunicación y la computación cuántica (Chen *et al.*, 2023).

CUBITS CON UNIONES JOSEPHSON

Para representar los estados de los cubits se necesita una implementación física. En la analogía de la moneda, la moneda cuántica sería el objeto físico que representa los estados de un cubit.

Una opción es usar sistemas cuánticos, como los átomos o iones individuales. No obstante, estos sistemas microscópicos tienen parámetros predefinidos por la naturaleza y pueden ser difíciles de controlar (Arriola, 2004). Además, en la naturaleza solo se encuentran unos pocos sistemas con dos niveles, como los sistemas de espín $-1/2$, que describen partículas con un momento angular intrínseco que puede tomar dos valores (Houck *et al.*, 2009). Los sistemas con dos niveles son cruciales en la computación cuántica debido a que el espín de cada nivel codifica un $|0\rangle$ y un $|1\rangle$ respectivamente, que son el pilar fundamental de la computación cuántica. Dichos estados se escriben en forma matemática de acuerdo con la ecuación 1. Por esta razón, algunos equipos de investigación optaron por circuitos que pueden ser fabricados en un chip. Además de ser relativamente fáciles de fabricar, estos circuitos eléctricos permiten diseñar los parámetros de los cubits y, en ocasiones, también ajustarlos directamente durante el experimento (Bader, 2013) lo cual es una gran ventaja. A estos circuitos a veces se les llama átomos artificiales, y sus dimensiones suelen estar en el rango de 300 a 500 micrómetros (Wang *et al.*, 2022). Otro aspecto importante es que utilizan la coherencia cuántica (capacidad de un sistema cuántico para mantener su comportamiento ondulatorio y su superposición de estados) del estado superconductor para minimizar la disipación (pérdida) de energía no deseada en el sistema (Houck *et al.*, 2009). Sin embargo, tienen el inconveniente



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

de que su tiempo de coherencia es relativamente corto (Wang *et al.*, 2022).

El estado de superposición de un cubit es delicado y puede ser afectado por las pérdidas. Al fabricar los circuitos con material superconductor y operarlos a temperaturas por debajo de la temperatura crítica, se evita la disipación de energía en forma de calor. Sin embargo, para que el circuito superconductor pueda desempeñar su función como cubit, también es necesario un elemento no lineal (Bader, 2013).

La unión Josephson es el elemento que provee la no linealidad requerida para convertir un circuito superconductor en un cubit (Kockum y Nori, 2019). Los circuitos superconductores representan una de las principales vías para lograr una computadora cuántica que pueda tolerar fallos (Chen *et al.*, 2023).

Una unión Josephson puede ser integrada en los circuitos de diversas formas para crear un cubit. Por lo general, los cubits de unión Josephson tienen frecuencias de transición que van desde 1 hasta 10 gigahercios y operan a temperaturas del orden de los 10 milikelvin (Martinis, 2022).

Los circuitos superconductores que se abordarán a continuación, tienen tres elementos: capacitores, inductores y uniones Josephson.

Existen tres tipos básicos de cubits de unión Josephson: cubits de carga, cubits de flujo y cubits



© Enrique Soto. Serie Viacrucis, Huaquechula, Puebla, 2012.

de fase. De manera general, el cubit de carga, también conocido como la caja de pares de Cooper, es una caja para carga controlada por un voltaje externo; el cubit de flujo, llamado también cubit de corriente persistente, es un bucle controlado por un flujo magnético externo; y el cubit de fase es una unión Josephson polarizada por una corriente (Kockum y Nori, 2019).

Los átomos artificiales (cubits de unión Josephson) se han empleado para explorar nuevos regímenes de óptica cuántica y física atómica que resultaban difíciles de alcanzar utilizando átomos naturales.

Para permitir la implementación a gran escala de estos cubits, es esencial que se conserve la coherencia cuántica durante el mayor tiempo posible (Bader, 2013).

Con el paso de los años, se han propuesto y probado muchas mejoras de los tres diseños básicos de los circuitos mencionados. Por lo tanto, se explicará el funcionamiento de un diseño actualmente popular, el cubit transmon.

CUBIT TRANSMON

El cubit transmon (abreviatura de *transmission-line shunted plasma oscillation qubit*) fue creado por Rob Schoelkopf (Ezratty, 2023). En palabras sencillas, es una versión modificada del cubit de carga.

Tiene una sensibilidad mínima al ruido 1/f (Houck *et al.*, 2009), también llamado ruido de baja frecuencia; es decir, tiene una sensibilidad mínima a disturbios. Se forma añadiendo otra capacitancia C_B , en paralelo con la unión Josephson, al circuito del cubit de carga (Bader, 2013). Esto aumenta la relación entre la energía de Josephson E_J y la energía de carga E_C (Hassler *et al.*, 2011) haciendo que el cubit sea menos sensible al ruido de carga.

Empleando el diseño y las fabricaciones del cubit transmon de última generación, se ha logrado obtener una vida útil de hasta 100 microsegundos (Kockum y Nori, 2019). Sin embargo, se requiere que la computación cuántica sea mucho más rápida, por lo que se esperan tiempos mucho menores de procesamiento, tales como 10^{-17} segundos. A pesar de este avance, aún no se ha logrado cumplir con

los requisitos de un sistema práctico de computación cuántica superconductora, particularmente para el umbral de errores corregibles (Wang *et al.*, 2022), es decir, el nivel máximo de error permitido en los cubits que puede ser corregido eficazmente mediante algoritmos en la computación cuántica.

Los cubits transmon presentan también algunas limitaciones, como los altos costos de implementación y su vulnerabilidad a ruidos ambientales (Hassler *et al.*, 2011) como el ruido electromagnético, las fluctuaciones térmicas o las vibraciones que provienen del entorno.

Además, se requiere que los cubits estén físicamente cerca para interactuar correctamente (Bader, 2013), ya que a medida que se aumenta el número de cubits, es difícil controlar todas las interacciones con precisión, lo que afecta al rendimiento del sistema. A pesar de estas limitaciones, se han empleado con éxito en un creciente número de experimentos y se ha demostrado una excelente correspondencia con la teoría (Houck *et al.*, 2009).

También hay desarrollos de diseño que se basan en el cubit transmon con el objetivo de expandirse a circuitos que tengan muchos cubits acoplados (Kockum y Nori, 2019). Un diseño de este tipo es el cubit xmon.

Los cubits transmon y xmon son ampliamente empleados en la computación cuántica superconductora debido a sus ventajas de buena coherencia, acoplamiento fácil y lectura, entre otros aspectos (Wang *et al.*, 2022).

La motivación más importante para mejorar el diseño del cubit ha sido extender el tiempo de coherencia del cubit, es decir, el tiempo durante el cual la coherencia cuántica del cubit se mantiene antes de perderse debido al ruido del entorno (Kockum y Nori, 2019).

CONCLUSIÓN

Los avances en la tecnología de cubits, especialmente los superconductores como los de unión Josephson, están abriendo nuevas posibilidades en el campo de la computación cuántica. Empresas como IBM y Google cuentan con grandes equipos



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

de investigadores con el objetivo de lograr que un número significativo de cubits de unión Josephson funcionen bien juntos.

Un cubit que destaca es el cubit transmon, que ofrece un control rápido y preciso, así como una mayor resistencia al ruido de baja frecuencia. Su diseño está optimizado para reducir el impacto de las variaciones en la frecuencia de funcionamiento, lo que lo hace más estable y lo convierte en un elemento clave para el desarrollo de sistemas cuánticos.

Sin embargo, estos cubits aún enfrentan desafíos, ya que esta tecnología está en su fase inicial y requiere el perfeccionamiento de tecnologías auxiliares, como las relacionadas con la física y los semiconductores.



© Enrique Soto. Serie Viacrucis, Huaquechula, Puebla, 2012.

R E F E R E N C I A S

- Arriola V (2004). *Computación cuántica*. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Bader S (2013). *The transmon qubit*. Massachusetts Institute of Technology.
- Chen L, Li HX, Lu Y et al. (2023). Transmon qubit readout fidelity at the threshold for quantum error correction without a quantum-limited amplifier. *npj Quantum Information* 9(1):26.
- Ezratty O (2023). Perspective on superconducting qubit quantum computing. *The European Physical Journal A* 59(5):94.
- Hassler F, Akhmerov A and Beenakker C (2011). The top-transmon: a hybrid superconducting qubit for parity-protected quantum computation. *New Journal of Physics* 13(9):095004.
- Houck A, Koch J, Devoret M, Girvin S and Schoelkopf R (2009). Life after charge noise: recent results with transmon qubits. *Quantum Information Processing* 8:105-115.

Kockum A and Nori F (2019). Quantum Bits with Josephson Junctions. In: Tafuri, F. (Ed.), *Fundamentals and Frontiers of the Josephson Effect* (pp. 703-741). Cham: Springer International Publishing.

Martinis J (2022). Surface loss calculations and design of a superconducting transmon qubit with tapered wiring. *npj Quantum Information* 8(1):26.

Reck E and Basak S (2022). Quantum Computer Music: Foundations and Initial Experiments. In: Miranda, E.R. (Ed.), *Quantum Computer Music* (pp. 43-67). Springer.

Wang C, Li X, Xu H et al. (2022). Towards practical quantum computers: Transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds. *npj Quantum Information* 8(1):3.

Giselle N. Morales Rosales

giselle.mora17@gmail.com

Manuel Ávila Aoki

Centro Universitario UAEM Valle de Chalco

Universidad Autónoma del Estado de México